Aus dem zahnärztlichen Institut der Universatät Berlin.
(Leiter: Prof. Dr. H. Schröder)

Die mechanischen Druckumsätze im Wurzelgebiet der menschlichen Zähne zur Ueberwindung des Kaudruckes

Inaugural-Dissertation

zur

Erlangung der

Zahnärztlichen Doktorwürde

an der

Friedrich-Wilhelms-Universität
zu Berlin

vorgelegt von

Wilhelm Kampf
Zahnarzt, aus Oldenburg

Tag der Promotion: 20. 8. 1934.

Druck von Gebrüder Hoffmann, Charlottenburg, Schillerstr. 44

Gedruckt mit Genehmigung

der

Medizinischen Fakultät der Universität Berlin

Dekan: Prof. Dr. Gocht.

Referenten: Prof. Dr. Axhausen
Prof. Dr. Schröder

Die mechanischen Druckumsätze im Wurzelgebiet der menschlichen Zähne zur Überwindung des Kaudruckes.

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA40153309_0027

1. Kronendruck und Wurzeldruck als entgegengesetzt gerichtete Kraftwirkungen innerhalb des Hartgebildes.

Die Entstehung des Kaudruckes ist auf die durch Kontraktion bestimmter Muskelgruppen erzeugte, bewegte Kraft zurückzuführen, mit welcher der Unterkiefer den zu zerkleinernden Bissen gegen den als fest stehend gedachten Oberkiefer zu pressen bestrebt ist. Mit der Hemmung der von der Mandibula aufwärts getragenen Bewegung beginnt die Wirkung, die sich im bezahnten Munde äußerlich als eine Pressung zwischen den Kauflächen oder Schneidekanten der Hartsubstanzen bemerkbar macht. Bis zu diesem Punkte können wir die einzelnen Phasen des Geschehens sinnlich wahrnehmen; der weitere Ablauf jedoch des Kräftespieles entzieht sich unserem unmittelbaren Beobachtungsvermögen. Wir versuchen daher, uns mit Hilfe statischer Ueberlegungen, sowie durch histologische Untersuchungen und Röntgenbilder eine Vorstellung zu machen; auch dürften gelegentlich pathologische Veränderungen am Zahn selbst oder in seiner Umgebung richtungweisend für den gesunden Ablauf sein.

Wenn wir z. B. sehen oder fühlen, daß der belastete Zahn — wenn auch nur um ein geringes Maß — in seine Bettung einsinkt und nach Entlastung federnd die Anfangslage wieder zu erreichen sucht, so muß sich der Kronendruck zur Wurzel fortgepflanzt haben, und diese hat ihn in gleicher Richtung und Stärke zurückgegeben. Da wir nun wissen, daß die Zahnwurzel nicht unmittelbar auf einer Knochenplatte ruht, sondern von Bindegewebselementen eingehüllt ist, so darf die Annahme gerechtfertigt sein, daß eben dieses Bindegewebspolster der Träger des Kaudruckes ist. Es muß somit eine Kraftübertragung von der Wurzeloberfläche zu den sie umhüllenden Weichgebilden erfolgen, die als Zug, als Druck oder als Kombination beider Reaktionen

auftreten kann. Als Grenzfälle sind denkbar, daß entweder der gesamte Kaudruck durch Zugbeanspruchung der Bindegewebsfasern im Wurzelgebiet abgefangen, oder daß er zur Wandpressung umgesteuert wird.

Eine zeichnerische Darstellung des ersten Belastungsfalles würde in schematischer Form in Abb. 1 angedeutet sein. Wir

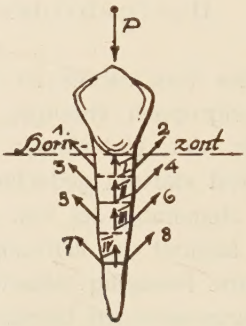


Abb. 1.
Ueberwindung des vertikalen Kronendruckes P nur durch Zugkräfte im Wurzelraum.

sehen einen unteren einwurzeligen Zahn, der durch seine Antagonisten mit P kg gedrückt wird. Wenn dieser Zahn im Gleichgewicht bleiben soll, so müssen die wandständigen Bindegewebsfasern von der Art 1 bis 8 mit einer Intensität aufwärtsziehen, daß die Summe ihrer wirkung gleich P ist, jedoch in umgekehrter Richtung.

Den zweiten Grenzfall würde Abb. 2 zeigen. Dort ist der auf die Gesamtoberfläche wirkende Wurzelwanddruck durch die Linien 1 bis 8 versinnbildlicht, deren resultierender Effekt den Wurzelkörper in gleicher Richtung und Stärke aufwärtsbewegt, wie die Kronenpressung ihn abwärtsdrückt.

Wir denken uns nun den Wurzelkegel in eine beliebig gewählte Anzahl Abschnitte, z. B. I bis IV, geteilt, die unter sich gleichen Oberflächenraum besitzen sollen, dann wird jedes dieser vier Segmente — ob nun gezogen oder gedrückt — mit gleicher Wandkraft aufwärtsgetrieben unter der einstweiligen Einschränkung, daß das Periodontium gleichmäßig organisiert ist. Wo und wie nun immer der Widerstand im Periodontalraum gegen die

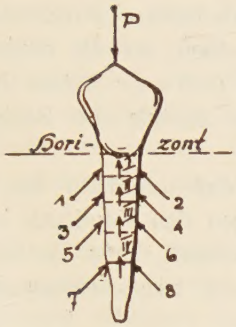


Abb. 2.
Ueberwindung des vertikalen Kronendruckes P nur durch Zugkräfte im Wurzelraum.

Kronenbelastung auftritt, stets müssen die dabei tätigen Einzelkräfte so auf den starren Wurzelkörper wirken, daß sie sich fortschreitend aufreihen im Sinne der Pfeilrichtung, dem Kronendruck entgegen; denn die Beanspruchung irgendeines beliebigen Wurzelquerschnittes teilt sich seinem zunächst über ihm liegenden Nachbarn mit. Der Wurzeldruck wächst also von der Wurzelspitze zum Horizont innerhalb des Hartgebildes, daher muß dieses auch im gleichen Sinne an Umfang und Masse zunehmen und kegelförmig werden. Würde es auf einer Basisplatte ruhen, dann müßte die untere Endigung verbreitert sein, weil an dieser Stelle der Druck kulminiert; dann wäre wiederum ein hoch organisiertes Paradentium nicht nötig. Der oft zitierte Vergleich mit einem in lockerem Erdreich befindlichen, angespitzten Pfahl ist insofern nicht ganz zutreffend, weil der Pfahl infolge Belastung oder Eigengewicht soweit einsinken muß, bis aus dem von ihm zusammengedrückten Boden ein festes Fundament geworden ist, das ihn trägt.

Wir erkennen somit, daß Kronendruck und Wurzelpressung reziproke Werte sind, die in ihrer wechselseitigen Vorausgesetztheit das Leben des Zahnes von der ersten Phase seiner Entstehung an beherrschen. Denn wie das Einsinken des ektodermalen Mundepithels in das Mesoderm der embryonalen Kieferanlage als werdende Schmelzleiste den Anreiz gibt, daß auch das mittlere Keimblatt mit dem Vortreiben von Bindegewebspapillen, als den späteren Pulpen, in entgegengesetzter Richtung antwortet, so

müssen diese Widerspruchsreize möglichst während des ganzen Zahnlebens bestehen bleiben, um die einzelnen Gebißglieder funktionsfähig zu erhalten. (Römer betont in der Entwicklung und Formung des Organum dentale die Reziprozität von Mesoderm und Ektoderm).

Die Erkenntnis, daß innerhalb des Hartgebildes der Wurzel der Widerstand gegen den Kaudruck in der Richtung von der Spitze zum Zahnhals verläuft, kann für die folgenden Betrachtungen über die Zug- und Druckbeanspruchung im Periodontium verwertet werden.

2. Untersuchungen über die Zugbeanspruchungen der Wurzelhautfasern zur Ueberwindung des Vertikaldruckes.

Wir gehen von der Annahme aus, daß die beim natürlichen Kaugebrauch der Zähne auftretenden Vertikalkräfte nur durch Zugspannungen innerhalb des Periodontium abgefangen werden, ohne Berücksichtigung der dabei entstehenden Wandpressungen. Dieser Belastungsfall war im vorigen Abschnitt der Abb. 1 zugrunde gelegt, wo die einzelnen Gruppen der Zugsbänder mit den Ziffern 1 bis 8 bezeichnet waren; allerdings unter der Voraussetzung, daß die Zugrichtung aller Bindegewebsfasern auf der ganzen Wurzellänge die gleiche ist. Da wir nun wissen, daß in Wirklichkeit die Faserrichtung innerhalb der Wurzelhaut nicht gleichartig ist, so folgt zunächst allgemein, daß auch ihr Spannungsvermögen und damit ihre Wirkung verschieden groß sein muß. Wenn z. B. in Abb. 3 ein fester Punkt E senkrecht aufwärtsge-

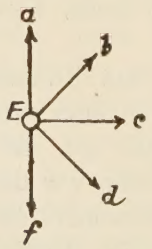


Abb. 3.
Zugwirkung verschieden gerichteter Bänder a—f auf einen festen Punkt E.

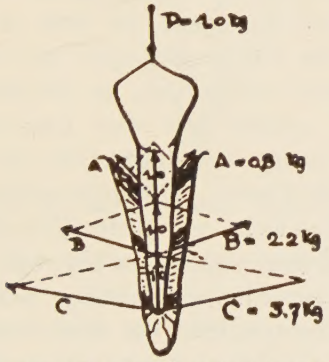
zogen werden soll, so würde das ohne Kraftverlust durch das senkrechte Zugband a bewirkt werden; falls dies konstruktiv nicht möglich ist, würde das Zugband b die Funktion übernehmen, wobei allerdings schon eine schädigende Seitenkomponente auftritt, die den gewollten Endeffekt mindert, das Band c zieht nur horizontal zur Seite, während d und f als negativ zu werten sind, weil sie abwärts ziehen.

Innerhalb der Wurzelhaut können praktisch also nur diejenigen Fasern einen Aufwärtszug ausüben, die von der Wurzeloberfläche in mehr oder weniger schräger Richtung aufwärts zur Bettungswand ziehen, also die Fibrae alveolodentales obliqui superiores et inferiores. Die horizontal gelagerten wären allenfalls noch imstande, die Wurzel schwebend in ihrer Lage zu erhalten, während alle abwärtslaufenden, darunter die radial vom Apex ziehenden Bündel statisch unberücksichtigt bleiben müssen, weil sie den Zahn in die Alveole zu ziehen bestrebt sind, also dem senkrechten Druck noch Vorschub leisten.

Um nun die Art und Verhältnisgröße von belasteten peridontalen Sehnenzügen konstruktiv zu bestimmen, ist in der Abb. 4

Abb. 4.

1,0 kg = 1,4 cm Länge



Zugwirkung von 3 verschieden geneigten Faserbündel A, B u. C.

ein Hartgebilde dargestellt, das in seinen äußeren Dimensionen einen unteren Prämolaren angenähert ist; wir wählen also Konstruktionsbeispiele von den Fibrae alveolodentales obliqui superiores

et inferiores, drei verschieden geneigte symmetrisch gelagerte Bündel A, B und C, wie sie in ihrer unterschiedlichen Schräglage etwa der Wirklichkeit entsprechen mögen. Die Konstruktion ergibt nach dem Parallelogramm der Kräfte, daß zwei Bündel von der Richtung A mit je 0,8 kg Zug, oder statt ihrer zwei andere Bündel von der Richtung B mit je 2,2 kg Zug, oder endlich zwei weitere Bündel von der Richtung C mit je 3,7 kg Zug erforderlich sind, um 1,0 kg Kronenpressung zu tragen. Nehmen wir den Mittelwert statt der übrigen, so muß gelten, daß je 1,0 kg axialen Kronendruckes etwa 4,4 kg Zugspannuung innerhalb des Periodontium entsprechen, sofern der Zahn im Gleichgewicht bleiben soll. Dieser relativ hohe Zahlwert, der aus der Schräglage der Fasern stammt, dürfte an sich durchaus angemessen erscheinen; denn Roux setzt die Zugfestigkeit von Sehnen, die Muskel- und Skeletteile bei Gelenken verbinden, gleich der des weichen Eisens, also etwa 2,0 bis 5,0 kg pro Quadratmillimeter Querschnitt, wobei allerdings in unserem Falle vorausgesetzt werden muß, daß die Endbefestigungen der Wurzelsehnen im Zement einerseits und der Knochenplatte der Bettungswand andererseits ausreichend gesichert sind. In Bezug jedoch auf die Gesamtanordnung der Haltekonstruktion können Bedenken über ihre Wertigkeit entstehen.

Denn die Zugbänder der Wurzeloberfläche treten nicht wie die Skelettsehnen als homogene, in einer Scheide zusammengefaßte Gebilde auf; sie sind geschlängelt; sie verlaufen nicht in der von ihnen geforderten Zugrichtung; sie werden bei Beanspruchung seitlich abgebogen, müssen also eine Lageveränderung zu ihrer unmittelbaren Umgebung vornehmen, die als sie durchkreuzende oder überschneidende Fasern, als Kapillarschlingen, als ungeformtes Binde- sowie Keimgewebe ein nicht geringes Hindernis bilden. Diese Eigentümlichkeiten lassen keineswegs auf eine über die ganze Wurzellänge verteilte, gleichmäßige Kraftbewältigung mittels Zug schließen. Ueberdies lehrt die Abb. 4, daß die Haltebänder nicht viribus unitis, sondern zeitlich und räumlich nacheinander in Funktion treten müssen; somit würde die Gefahr bestehen, daß der gesamte Druckstoß zeitweilig von nur einem Teil der Bänder getragen werden muß und diese überanstrengt. (Der bei spontan betätigten, exzeptionellen Kaufunktionen auftretende Schmerz ist wahrscheinlich auf diese Zustände zurückzuführen.) Während man

nun bei Skelettsehnen die Materie gewissermaßen als zusammengeballte, einem bestimmten Ziel zustrebende Energiemasse sehen kann, die unmittelbar auf jede Bewegung antwortet, trifft man in der Umgebung der Zahnwurzel ein System von Kraftlinien, das für den einen gedachten Zweck, nämlich die Ueberwindung vertikaler Druckstöße mittels Zug, ohne einheitliche Tendenz zu sein scheint, weil es von Nebengebilden (Kapillarschlingen, Keimgewebe, etc.) durchsetzt ist und weil es in der Zugrichtung wechselt. Da nun die Bindegewebsbänder in der Zervikalregion steiler verlaufen, als die ihnen apikalwärts folgenden, deren Richtung über die Horizontallage in die abwärtsgeneigte an der Wurzelspitze übergeht, so folgt daraus, daß die Zugkraft der Wurzelhaut in der Gegend des Zahnhalses am größten sein muß, sodann in der Richtung zur Wurzelspitze abnimmt, um in der Nähe des Wurzelloches gleich Null zu werden. Würde man den Ablauf der Kräfte nach ihrer Größe darstellen, so ergibt sich eine Zugskurve wie in Abb. 5.

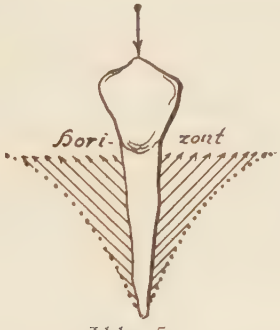


Abb. 5.
Diagramm der periodontalen Zugbeanspruchung.

Auch ohne statische Untersuchungen bringt uns eine einfache Ueberlegung zu dem gleichen Schluß; denn wir wissen, daß die Wurzel konisch ist, mithin ihr Umfang, zur Spitze gesehen, abnimmt. Selbst wenn nun alle Zugbündel gleich stark und gleich gerichtet wären, so müßte doch ihre Zahl abnehmen, weil die Angriffsfläche sich mindert; oder aber die apikalen Bindegewebszüge müßten erheblich mächtiger und dichter sein und steil aufwärtsziehen, was bekanntlich beim gesund verankerten Zahn nicht der Fall ist.

Zusammenfassung: Die Haltekonstruktionen der Wurzelhaut, die als Bindegewebszüge von der Wurzeloberfläche zur Bettungswand ziehen, können für sich allein die Vertikalbelastung des Zahnes tragen. Sie werden auf Zug beansprucht, jedoch nicht gleichmäßig auf der ganzen Wurzellänge, sondern am Zahnhals intensiver als an der Spitze.

3. Untersuchungen über die Druckbeanspruchung der Wurzelhaut zur Ueberwindung vertikaler Kräfte.

Eine zweite Art der Kraftumsteuerung innerhalb des Wurzelgebietes kann eintreten, wenn durch Kompression des periodontalen Bindegewebspolsters eine Pressung der Wurzeloberfläche erfolgt. Diese tritt ein, wenn die Wurzel sich in ihre Knochenhöhle einsenkt und so ihren Bettungsraum verkleinert.

Der Druck gegen die Wurzeloberfläche wirkt sich statisch am günstigsten aus, wenn sich das Hartgebilde im Sinne der Auftriebsrichtung verbreitert, mithin konisch oder keilförmig ist. Bei einem solchen Gebilde wird jede senkrechte Wandkraft ausgenützt (Abb. 6a). Es vereinigen sich die Kräfte 1 und 3, 2 und 4 zu den gleichgerichteten Resultierenden r 1 und r 2. (Bei zylindrisch geformten Körpern heben sich diese Kräfte gegenseitig auf, wie Abb. 6b zeigt, und bei solchen, die unten breiter als oben sind, erreicht man eine negative Wirkung nach Abb. 6c). Die

Abb. 6a

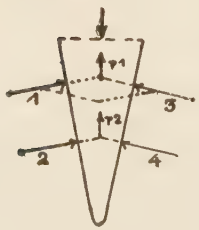
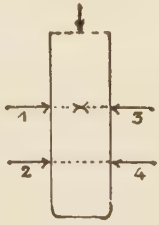
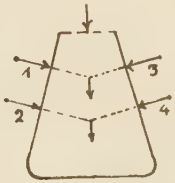


Abb. 6b



Ab. 6c



Die Wirkung von Seitenkräften auf die Wände verschieden gestalteter Körper.

Keilform der Wurzel ist also auch unter diesem Gesichtswinkel gesehen, die gegebene. Die durch sie bestätigten Kraftumsätze

sind in Abb. 6a für die Kräfte 1 und 3 konstruktiv ermittelt. Man sieht daraus, daß es mit Hilfe dieser einfachen Maschine möglich ist, horizontale Kräfte in vertikale und umgekehrt vertikale in horizontale umzusteuern. Dieses Instrument ist ein Symbol der Zielstrebigkeit und des Kraftwillens; daher dürfte es kein Zufall sein, daß es ungezählte Anwendungsformen in der belebten und unbelebten Welt gefunden hat. Keilförmig durchbricht der Pflanzenkeimling das Erdreich, um zum Lichte zu gelangen, die Blätterknospe ihre Hülle, das ausschlüpfende Hühnchen die Eischale; in gleicher Weise dringt der Blütenstaub befruchtend in die Narbe und die tierischen Spermatozoen in das weibliche Ei; der Fisch teilt die Fluten des Wassers, der Vogel das Luftmeer, Maulwurf und Regenwurm graben sich in die Erde; alle gebrauchen sie die Keilform. Und der Mensch ahmt es nach: Pflug, Wasserschiff, Torpedo, Luftschiff, Messer, Axt, Nagel, Nadel, Schere, Bohrer; Schraube, Spaten, Säbel, Säge, Speer, Pfeil sind Keilgebilde. Manche von tierischen und pflanzlichen Lebewesen betätigten Kraftleistungen, die unserm Verstande fast unbegreiflich erscheinen, weil ihr Umfang ans Märchenhafte streift, werden dem Fassungsvermögen des Denkens nähergerückt, wenn wir die Keilwirkung erkennen. Ein solches Wunderwerk von Druckbewältigung tritt uns auch innerhalb der Gebißglieder entgegen, von deren Wesensart W. Bauer so treffend sagt: „Nirgendwo im menschlichen Skelettsystem ist eine so vollendete zweckentsprechende, funktionelle, mechanischen Leistungen angepaßte Gestaltung und Bauart zu finden wie im Kiefer und Gebiß“

Einen wesentlichen Anteil der Druckbewältigung kann somit die Zahnwurzel übernehmen, eben weil sie ein Keil ist. Jedoch darf die Nutzanwendung der mechanischen Gesetze nur unter gewissen Vorbehalt geschehen. Denn wir sahen bisher das Instrument, das nur für sich unmittelbar in seine Umgebung Kräfte ausstrahlt und abgibt. Das kann die Zahnwurzel nicht ohne weiteres, weil an ihr und in ihr Zugbänder der Wurzelhaut befestigt sind. Diese hemmen nicht nur die Bewegung der Wurzel, das ist ihre natürliche Aufgabe, sondern sie beeinflussen durch ihre wechselnde Schräglage ihre unmittelbare Umgebung so, daß auch verschieden große Wirkungen auftreten. Die Zusammenhänge sind in der Abb. 7 zeichnerisch angedeutet. Drei Arten von verschie-

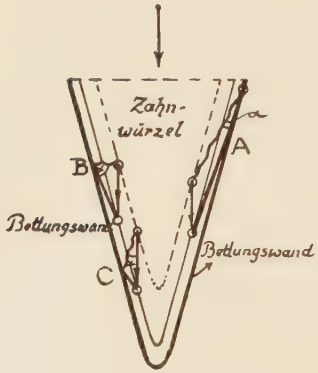


Abb. 7.
Exkursion von drei verschieden geneigten Wurzelhaut-Fasern A, B, C bei Druckbewegung der Zahnwurzel.

den geneigten Faserbündeln, nämlich die steil aufwärtsziehenden Zugbänder A, die horizontal gelagerten B und die abwärtsgerichteten C werden alle um die gleiche Länge mit der belasteten Zahnwurzel abwärts gesenkt. Dabei wird A um nur etwa $^1/_5$ seiner Länge ziehend vergrößert, B um mehr als die Hälfte und C wird dagegen verkürzt und gequetscht. Das Zugband a wird nur wenig zur Seite geschoben, b erheblich mehr und c am meisten. (Vergleiche die Größe des Ausschlagwinkels α). Das Zugband A wird seinen geschlängelten Verlauf aus der Ruhelage wahrscheinlich bei nur mäßigem Kaudruck in geringem Umfang durch den Zug aufgeben müssen, während B straffer gespannt wird, die nähere Umgebung der Wurzelspitze jedoch wird allseit zusammengepreßt. Diese konstruktiv gefundenen Momente sprechen dafür, Daß der Druck infolge Keilwirkung nicht gleichmäßig über die ganze Wurzellänge verteilt sein kann, sondern daß er vom Zahnhals in der Richtung zur Spitze zunimmt.

Für diese Annahme spricht auch die Beobachtung von G. W e t z e l, der in der apikalen Region des Zahnfaches die Knochenbälkchen der Spongiose in kegelförmiger Anordnung sah. (Abb. 8.)

Ein Diagramm der in dieser Form auftretenden periodontalen Druckkräfte würde schematisch in Abb. 9 angedeutet sein.

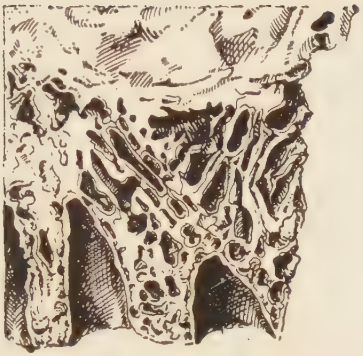


Abb. 8. (nach Wetzel)
Druckkegel der Spongiosabälkchen am Boden eines Zahnfaches.

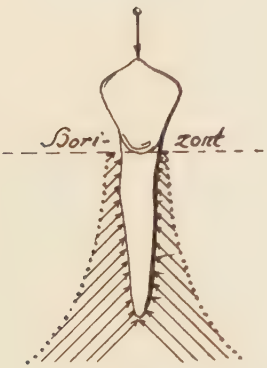


Abb. 9.
Diagramm der peridontalen Druckbeanspruchung bei Vertikallast.

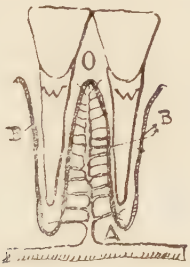
4. Die Beteiligung der Blut- und Gewebsflüssigkeit an der Ueberwindung vertikaler Druckkräfte.

Wenn die belastete Zahnkrone ihre Wurzel in die zugehörige Knochenhöhle zu treiben bestrebt ist, strahlt der entstehende Wurzel-Wanddruck in den periodontalen Raum aus, wird übertragen auf die reichlich in ihm vorhandene Gewebsflüssigkeit und verbreitet sich in allen Lücken zwischen Bindegewebsfasern, ungeformten Bindegewebe, Keimgewebe, sowie Blut- und Lymphkapilla-

ren, um ihn sodann an die Bettungswand weiterzuleiten. Mit einer solchen Druckübertragung von einem festen Körper zu einem zweiten unter Vermittlung einer zwischen ihnen gelagerten Flüssigkeit, die wir im praktischen Leben als hydraulische Pressung bezeichnen, können bedeutende Kräfte mobilisiert werden, entsprechend der Fläche der gedrückten Querschnitte. Nach diesem Prinzip muß der lebende Organismus zwangsläufig arbeiten, wenn er örtliche Druckzentren entlasten will, wie wir es z. B. im Kreislauf des Blutes und bei respiratorischen Vorgängen beobachten. Auch bei Kaustößen der Zähne tritt dies in die Erscheinung. Sobald sich nämlich die Druckwelle von der Wurzeloberfläche ausgehend zur Bettungswand bewegt, wird sie als Ganzes in zahlreiche Bruchteile aufgespalten, deren Wirkung schließlich im Röhrensystem der Spongiosa des knöchernen Alveolarfortsatzes unschädlich endet; etwa wie man das Spritzen des Wasserstrahles aus einem Druckrohr aufheben kann durch Einschaltung eines Siebes in die Ausflußöffnung.

Für den periodontalen Raum ist der Flüssigkeitsdruck statisch und physiologisch von Bedeutung, weil er sich gleichmäßig verteilen kann und daher alle im Wurzelgebiet an- und eingelagerten Organe gleichmäßig und allseitig umfließt. Das scheint besonders wichtig für das Gefäßnetz zu sein. Die Blut- und Lymphgefäße treten hier als dichte Kapillarnetze mit Knäuelbildung auf; in der Nähe vom Apex und am Eingang der Alveole finden sich komplizierte Ausbauten, ähnlich den Glomeruli der Niere, mit konzentrisch angeordnetem Bindegewebe. Diese Einrichtung hat offenbar den Hauptzweck, den Weg der Fluida zu vergrößern, um ihre Geschwindigkeit zu mindern und die Wandfläche der Gefäße zu steigern; sie sind nicht etwa nur, wie Schweitzer meint, krankhafte Ausbuchtungen (Divertikel). Sofern es möglich wäre, die Gesamtfläche aller Kapillarschlingen rechnerisch zu bestimmen, so würde zahlenmäßig der Nachweis erbracht werden können, daß auch bei starkem Kaudruck die Beanspruchung der Gefäßwand klein bleibt; und darin dürfte das Endziel zu erblicken sein. Wenn dabei — wie schon erwähnt — am Apex besondere Vorsichtsmaßnahmen getroffen sind, so kann man darin einen weiteren Beweis erblicken, daß der Druck an der Wurzelspitze stärker werden kann als am Zahnhals.

Im interdentalen Knochenbau, wo sich bei Belastung mehrerer Zähne die Druckstöße von zwei benachbarten Wurzelflächen treffen, ist wiederum eine sinnreiche Verteilung möglich. Die A. interalveolaris steigt hier von der Tiefe des Kieferkörpers in die Höhe und gibt an die Wurzelhaut mehr oder weniger parallel verlaufende Fäden ab, die wie Sprossen einer Leiter angeordnet sind (Abb. 10). Druck, Geschwindigkeit und Menge des zuströ-



Ab. 10.
Sprossenartige Verzweigung der Art. interalveolaris.

menden Blutes werden bei A größer sein als bei O. Sobald nun die Oberfläche der gedrückten Zahnwurzel W ihre Pressung mittels der periodontalen Fluida an die Bettungswand B weitergibt, werden auch die in der Druckrichtung liegenden, zuleitenden Fäden der Arterie betroffen, in denen es durch die verlangsamte Bewegung zu einer Stauung kommen kann, die den Gesamtdruck stufenweise, entsprechend den Leitersprossen, in der Richtung von O nach A steigert, so daß eine Entlastung des engmaschigen, an Ausdehnung beschränkten Zervikalraumes eintritt.

Beim Nachlassen des Kronendruckes ziehen die angespannten Bindegewebsfasern, deren geschlängelte Züge ähnlich wie die Windungen von Spiralfedern wirken, den Zahn in seine Anfangslage zurück. Es müßte dabei ein Vakuum entstehen ähnlich wie im Zylinder unserer Injektionsspritze bei zurückgleitendem Kolben, wenn nicht die komprimierten Flüssigkeiten nachströmen. Es greift somit eine Saugwirkung Platz. Damit wird die abwechselnde Belastung und Entlastung von gesund verankerten Zähnen in ihren Wirkungen ähnlich der des Herzmuskels, wobei das Zubeißen der Systole, das Oeffnen der Zahnreihen der Diastole entspricht.

Nur mit dem Unterschiede, daß der Herzmuskel unmittelbar auf frei bewegliche Blutmengen drückt, während die Zahnwurzel die Gewebsfluida und die Endothelien der Kapillaren beeinflußt. Die Kapillarschlingen sind dabei eines der wesentlichsten Zwischenglieder, um den Druckstoß in statu nascendi unschädlich auf eine große Fläche zu verteilen; die Beschaffenheit und Widerstandsfähigkeit der Haargefäße ist somit wichtig für die Gesamtleistung. In diesem Zusammenhange gewinnt ein Wort von Römer erhöhte Bedeutung:

„Wenn es auch noch ein voreiliger Schluß wäre, . . . in der Kapillarentwicklung die entscheidende konstitutionelle Grundlage zu sehen, so erscheint doch die Kapillarentwicklung als ein die Partialkonstruktion des Odontoms wesentlich bestimmender Faktor".

Jedenfalls erkennen wir, daß diese Druckumsätze in bewegten Flüssigkeiten, die in dieser Arbeit nur vorwiegend statisch ausgewertet wurden, eine eminent wichtige physiologische Bedeutung haben können. Sie bilden ohne Zweifel einen Teil der Lebenskräfte, die das Paradentium und die Kieferentwicklung beherrschen, wie Landsberg nachwies, wenn die an Hundekiefern entfernten Zahnkeime eine Deformierung des Knochens mit sich brachten; oder wie wir beobachten, wenn die Entfernung eines gesunden Zahnes nicht Raum schafft, sondern Raum mindert.

5. Zusammengefaßte Betrachtung über die Beanspruchung der Wurzelhaut auf Zug und Druck durch den vertikal belasteten Zahn.

Wir gingen im Anfang von der Erörterung aus, daß Kronendruck und Wurzeldruck als entgegengesetzt gerichtete Reaktionen innerhalb des Hartgebildes auftreten, von denen diejenigen der Wurzel von der Spitze zum Zahnhals verläuft. Aus dem Periodontium stammen die Kräfte, die das Ganze im Gleichgewicht halten, und zwar treten sie gleichzeitig als Zug- und Druckspannungen auf; jedoch nicht so, daß sie sich gewissermaßen räumlich überdecken, sondern ineinandergreifen, zum Teil zusammenfließen, um sich wechselseitig zu ergänzen, oder abzulösen. Dadurch bewahren sich beide eine bestimmte Selbständigkeit, die sie befähigt, die

Funktion des anderen ganz oder teilweise zu übernehmen. Beim gesund verankerten Zahn in geschlossener Gebißreihe sind die Zugspannungen in der Zervikalregion am größten und nehmen spitzenwärts allmählich ab, die Druckspannungen dagegen sind in der Gegend vom Apex größer als am Zahnhals. Die Größen- und Lageverhältnisse veranschaulicht Abb. 11.

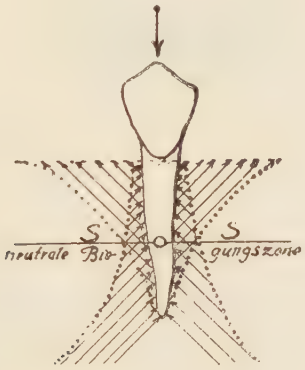


Abb. 11.
Diagramm von Zug und Druck.

Zug und Druck sind die beiden Grundpfeiler, auf die sich die Standfestigkeit des Zahnes stützt; in diesem Wechselspiel der Kräfte liegt die Möglichkeit, die Gleichgewichtslage des Hartgebildes zu erhalten, auch wenn Form- oder Stellungsänderungen an ihm selbst oder in seiner Umgebung auftreten, wie sie durch Wachstum oder Gebrauch von Kiefern und Zähnen bedingt sind. Die Erfahrung lehrt nun, daß Druck im Bereiche des Wurzelkörpers die Tendenz hat, resorptive Wirkungen in seiner Umgebung auszulösen, während bei Zug die Neigung besteht, eine Neubildung von Knochensubstanz in die Wege zu leiten. Wenn also der Periodontalraum während einer längeren Lebensperiode annähernd räumlich konstant bleiben soll, so müssen Anbau und Abbau im gleichen Verhältnis zu einander stehen; d. h. eine Einschmelzung auf der einen Seite muß eine Vermehrung auf der entgegengesetzten Seite begleiten. Damit tritt dann zwangsläufig eine Lageveränderung des Zahnes ein; und wenn dabei trotzdem die Standfestigkeit und Funktionsfähigkeit gewährt bleibt, so ist das

der organischen Umstellung von Zug und Druck zuzuschreiben.

Bei allein stehenden, stark belasteten Zähnen z. B., wie man gelegentlich besonders an Brückenpfeilern beobachtet, (Abb. 12)

Abb. 12.
Druckausbreitung bei stark belasteten Einzelzähnen.

können durch Knochenumbau infolge starker Beanspruchung auf der Zugseite die Periodontalbänder einen Teil ihrer federnden Beweglichkeit verlieren, dann erscheint die Wurzel in ihrer Bettung wie eingeklemmt. Die elastischen Bewegungen sind dadurch beschränkt, sodaß dar Widerstand des Zahnes gegen Kaubelastung vorwiegend mit Hilfe von Wurzelwand-Druck geleistet wird. (Man erkennt das im Röntgenbild besonders an dem Verlauf der Trajektorien im Alveolarfortsatz und Kieferknochen, über deren Bedeutung sich weiter unten Ausführungen finden.) In diesem Beispiel muß allerdings berücksichtigt werden, daß der Pfeilerzahn außer auf Vertikaldruck im Sinne seiner Längsachse auch auf Seitenhebelung senkrecht zur tragenden Achse beansprucht wird.

Für die den bisherigen Erörterungen zu Grunde gelegte Annahme, daß der Zahn nur vertikal belastet sei, escheint die Verteilung von Zug und Druck, wie sie in der Abb. 11 gekennzeichnet ist, eine erstrebenswerte Lösung zu sein. Denn die praktische Erfahrung lehrt, daß zur Sicherung der Standfestigkeit des Zahnes die Anforderungen an die Haltekonstruktion in der Gegend des Zahnhalses größer sind als an der Spitze, sodaß Verletzungen des Bandapparates oder Einschmelzung der Substanz in der Zervikalregion leichter zur Lockerung führen als ähnliche Vorgänge in der apikalen Zone. (Die Auswirkungen marginaler Paradentosen einerseits, oder derjenigen von Wurzelgranulomen und Resektion der Spitze andererseits könnten das bestätigen.) Der Organismus wird also danach streben, einen etwa entstehenden

Ueberdruck möglichst dorthin zu verlegen, wo er ohne schädigende Wirkung auf einen größeren Raum verteilt werden kann, das wäre am Boden der Alveole. Die Zugkräfte dagegen erfordern keine besondere Raumerweiterung, um ein Maximum an Leistung zu erzielen, können sich am zervikalen Wurzelabschnitt konzentrieren ohne durch das engmaschige interdentale Septum behindert zu werden.

Eine statische Besonderheit verdient in diesem Zusammenhang erwähnt zu werden. Wenn wir nämlich in Abb. 11 der Wurzellänge von der Spitze in der Richtung zur Krone oder auch im umgekehrten Sinne folgen, so sehen wir, daß die Zug- und Druckkräfte von ihren Höchstwerten kommend sich überschneiden und kleiner werden in entgegengesetzter Richtung. Irgendwo muß es dann einen Querschnitt SS geben, in welchem Zug und Druck gleich sind, also sich gegenseitig aufheben. Diese neutrale Zone SS wird somit zwangsläufig zum Drehpunkt falls der Zahn zur Seite gehebelt wird. Vielleicht erklärt sich damit die eigenartige Gestaltung des Periodontalraumes, der bei SS eingeengt erscheint, um sich nach oben und unten zu verbreitern.

Für den vertikalen Kaudruck ohne erhebliche horizontale Seitenkomponente scheint das Zusammenspiel von Zug und Druck im Wurzelgebiet, sowie die Herausbildung einer neutralen Biegungszone, wie es zu schildern versucht wurde, eine statisch und physiologisch günstige Lösung zu sein; jedenfalls ist die Konstruktion einfach, sie wirkt primitiv. Wir dürfen somit zu der Annahme berechtigt sein, daß die Ursachen der längeren Lebensdauer, wie man gelegentlich an Zähnen mit sog. geradem oder Kopfbiß beobachten kann, auf diese Kraftverteilung zurück gehen. Auch würde die Ansicht mancher Anthropologen eine Stütze finden, nach welcher der gerade Biß, wie ihn z. B. die Menschen des Chelléen, der Neanderthalrasse, sowie die Jungpaläolithiker meistens gehabt haben, eine Ursprungsform darstellt.

Eine nicht unwesentliche Komplikation erfährt die Zahnbelastung durch das Auftreten von horizontalen Hebelkräften, wie sie infolge Transversalschwingungen der Mandibula besonders bei geneigt gestellten Höckerzähnen entstehen. Sie sollen uns im folgenden Abschnitt beschäftigen.

6. Der Zahn unter dem Einfluß horizontaler Seitenkräfte.

Man hat den menschlichen Zahn und seinen Stützapparat ein schwingendes System genannt. Von einem schwingenden Gebilde erwartet man einen gewissen Grad von Elastizität, entweder in seiner Gesamtheit, oder in einzelnen seiner Teile. Da nun das Hartgebilde selbst trotz der elfenbeinartigen Struktur wegen seiner kurzen, gedungenen Form praktisch als starr angenommen werden kann, so dürfte das Schwingungsvermögen nur in der Umgebung des Zahnes, also im Peridontium und dem benachbarten Knochengefüge zu suchen sein. Von einer Hebelkonstruktion werden jedoch federnde Bewegungen seiner Teile theoretisch nicht berücksichtigt und praktisch möglichst vermieden. Man ist nun geneigt, den menschlichen Zahn als Hebel aufzufassen, und zwar als zweiarmigen, dessen Drehpunkt etwas unterhalb der Mitte der klinischen Wurzel zu suchen sei. Die Theorie stützt sich dabei im Wesentlichen auf die Tatsache, daß das Peridontium an der genannten Stelle räumlich am kleinsten ist und mit wachsender Entfernung, sowohl in der Richtung zum Zahnhals wie zur Spitze, an Umfang zunimmt.

Heinroth verlegt in seinen experimentellen Versuchen, den Winkelausschlag kippender Zähne mit Hilfe des Mikro-Elastometers zu finden, den Drehpunkt in das zervikale Drittel der von Weichteilen bedeckten Wurzellänge nach Abb. 13. Die Zahnwurzel

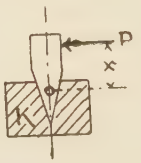


Abb. 13.
Hebelwirkung nach Heinroth.

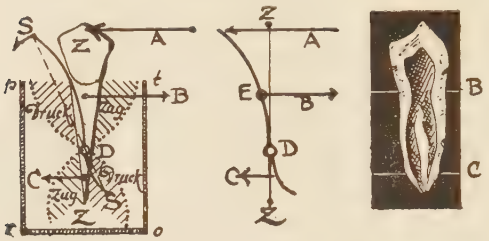
wird hier in einem Gummikörper (K) befindlich gedacht und nun angenommen, daß „zwischen den auf Zug beanspruchten Fasern, die die Zahnwurzel halten, und dem mit Druck reagierenden Gummikörper kein grundsätzlicher Unterschied besteht". Dieser Auffassung kann man kaum beitreten, denn gerade in den Zugkräf-

ten der Wurzelhaut liegt ihr entscheidender und zeitlich zuerst auftretender Widerstand. Weiterhin ist zu erwägen, daß in dem zitierten Beispiel in der Gummibettung ungleichmäßige Kantenpressungen stattfinden können, die die ganze Unterlage deformieren und in ihr wechselnde Reaktionen hervorrufen. Die druckverteilende Wirkung der die Zahnwurzel umspülenden und alle Nachbargewebe durchdringenden Fluida ist ausgeschaltet sehr zum Nachteil der konstruktiven Idee; dann mit ihrer Hilfe will der Organismus erzwingen, daß sich möglichst nirgend zwei starre Körper unmittelbar pressend berühren und schädigen.

Dieser vielerörterten Frage soll an der Hand der Abb. 14 näher getreten werden. Das Hartgebilde in seiner ganzen Länge sei der vertikale Keil ZZ, der sich in dem rechteckig umrissenen Periodontium prot. befindet. Der Drehpunkt sei zunächst willkürlich in D festgelegt. Sobald nun eine Horizontalkraft A, die an der Krone angreift, den Zahn seitlich abbiegt, so muß er um den angenommenen Drehpunkt D pendeln und in die Schräglage SS ausschlagen. Im Periodontiumraum werden die Widerstände gegen diese Bewegung zunächst mobilisiert, und zwar tritt bei Raumverminderung (oben links und unten rechts) Druck auf, bei Raumerweiterung (oben rechts und unten links) Zug. Der Drehpunkt bleibt dabei neutral. Die Widerstände im Gebiet der Wurzelhaut bestehen aus zwei Gruppen, von denen die eine (B) nach rechts, entgegengesetzt der Kronenhebelung A, die andere nach links im gleichen Sinne wie die Anfangskraft A wirkt. Jede der beiden Einzelgruppen setzt sich aus der Summe von Druck und Zug aus dem Periodontium zusammen. Das zugehörige Belastungsschema zeigt Abb 15; denkt man sich zugleich das Hartgebilde ZZ als elastische Linie, so ersieht man aus der dann entstehenden S-ähnlichen Kurve, daß der meist gefährdete Querschnitt, d. h. derjenige, in dem der Stab ZZ brechen würde, im Punkte E zu suchen ist. Betrachtet man zum Vergleich den mediansagittalen Längsschliff eines unteren Prämolaren, (Abb. 16) so scheint es, daß die Hartsubstanz des Wurzelgebildes dieser Beanspruchung Rechnung trägt, indem sie bei B und C den tragenden Querschnitt verstärkt.

Die Annahme, daß der Zahn in der dargestellten Belastungsform ein zweiarmiger Hebel mit dem Drehpunkt D sein soll, scheint nicht haltbar wegen der Größe und Lage der Kraft B. Sie

Abb. 14. Abb. 15. Abb. 16



Kräfteschema bei Hebelwirkung. Prämolar aufgeschliffen.

hindert das Hartgebilde am seitlichen Pendelausschlag und würde den Punkt D so stark beanspruchen, daß nicht zu ersehen ist, woher dieser die Kraft nimmt, sich in seiner festen Lage zu behaupten, was von ihm als Drehpunkt einer Hebelkonstruktion unbedingt gefordert werden müßte. Die Widerstandskräfte nur aus dem Periodontium genügen also nicht, um eine hebelnde Bewegung bei starker Seitenbelastung des Zahnes herbeizuführen und ihn nach Entlastung wieder in seine Anfangslage zu bringen; er würde in diesem Falle disloziert und gelockert werden. Wir können das bei manchen Formen der Paradentose sehen, stellen allerdings dabei meistens fest, daß sie einhergehen mit krankhaften Veränderungen am Zahnfleisch und Knochensubstanz im Gebiete des Angriffes der Kraft B. Daraus dürfen wir mit Recht schließen, daß die gesunde Gingiva und das Knochengewebe die Kraft B abfangen, so daß sie in Wirklichkeit im Kräfteschema (Abb. 15) nicht erscheint. Dann ist der Zahn zum zweiarmigen Hebel geworden.

Um nun die Lage des Drehpunktes dieser Hebelkonstruktion zu ermitteln, vergegenwärtigen, wie uns aus der Abb. 11 wie sich über die Gesamtwurzellänge Zug und Druck aus dem Periodontium des belasteten Zahnes verteilen. Wir sehen dort, daß sich beide Reaktionen räumlich überschneiden und in der Ebene SS etwa gleichwertig sind. Da nun allgemein jede Biegungsbeanspruchung von festen Körpern ein korrespondierendes Auftreten von Zug und Druck voraussetzt, so muß in der Höhe von SS derjenige Querschnitt zu suchen sein, der einem etwa eintretenden Verbiegen den größten Widerstand entgegensetzt, somit muß hier zwangsläufig ein Drehpunkt entstehen. Seine Lage kann naturgemäß

nicht konstant sein, sondern sie wechselt je nach Intensität der Beanspruchung, nach konstitutionell bedingter Beschaffenheit der Haltekonstruktion, oder nach der Stellung des Zahnes in der Gebißreihe; sie wird etwa in der Mitte der klinischen Wurzel sein. Daraus dürfte ganz allgemein zu schließen sein, daß man die Ergebnisse von Tierversuchen über „die Veränderungen der Gewebe bei übermäßiger Beanspruchung der Zähne" (Gottlieb und Orban) nicht ohne weiteres auf das menschliche Gebiß übertragen kann.

Zusammenfassend erkennen wir:

Der intensiv horizontal und vertikal belastete, gesund verankerte Zahn wird durch die Beteiligung der Gingiva und der bukkolingualen Knochensubstanz zum zweiarmigen Hebel mit einem Drehpunkt, dessen Lage wechseln kann, jedoch meist etwa in der Mitte der klinischen Wurzel liegt. Der gering seitlich belastete Zahn jedoch, bei dem die Beanspruchung allein von dem elastischen Bindegewebspolster der Wurzelhaut getragen werden kann, wird zum schwingenden Stab. Er kann bei geeigneter Mundstellung als natürliche Resonanz der menschlichen Stimme Tonverstärkung, Wohlklang und Modulationsfähigkeit verleihen. Bei erkrankter Wurzelhaut können die Schwingungen der Wurzel durch leichtes Beklopfen der Krone abgetastet werden (Wurzelschwirren).

7. Die mechanische Funktion der Gingiva.

Das Zahnfleisch bildet den okklusalen Abschluß der Wurzelhaut; es umschlingt gleichzeitig bandartig in festen Bindegewebszügen sowohl oral wie vestibular den ganzen Zahnbogen, wobei es etwa die halbe Höhe des knöchernen Alveolarfortsatzes einnimmt und durch den M. buccinator mit demjenigen der Gegenseite in Verbindung tritt, so daß wir es als einheitliches Gebilde für beide Kiefer ansprechen dürfen. In sagittaler Richtung wird die Geschlossenheit des Ganzen im Sinne der Zahnreihe gewährleistet durch das Zwischenzahnband, das als horizontal gelagerte, kräftige Fasermasse von einem Zahnhals zum benachbarten zieht (Abb. 17). Es schützt die Zähne gegen Kippen in der Richtung

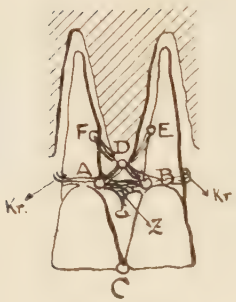


Abb. 17.
AB = Zahnzwischenband,
DB u. DE = schräge Zahnbänder
Z = Zahnfleischzahnband,
Kr = Kreisfasern.

des Zahnbogens, indem es in den interkoronalen Räumen mit Hilfe des Kontaktpunktes der Kronen feste Dreiecke bildet (ABC in Abb. 17); denn das Dreieck, nicht das Viereck, ist die Grundform aller standsicheren Konstruktionen. Daher erfordert z. B. jedes aus senkrechten Stützen und horizontaler Last bestehendes Bauwerk, sofern es nicht durch ein bedeutendes Eigengewicht gegen seitliche Verschiebung gesichert ist, eine Winkelverbindung oder Diagonalverstrebung. Eine solche Schrägverankerung ist nun im Gebiete der Zahnkrone aus funktionellen Gründen kaum vorstellbar; der Organismus verlegt sie daher in die Tiefe der Zahnzwischenräume. Diese Idee liegt auch der Anordnung des oberen und unteren Zahnbandes zu Grunde. Die oberen Zahnfleischfasern (Lig. dentale superius) ziehen vom Periost der Spitze des knöchernen Septum schräg kronenwärts zu beiden benachbarten Zahnhälsen; die unteren Zahnfleischfasern (Lig. dentale inferius) gehen vom gleichen Ansatzpunkte in entgegengesetzter Richtung. Beide Bänder unterstützen nicht nur die periodontalen Bindegewebszüge zur Ueberwindung vertikaler Druckkräfte, sondern sichern zugleich die Standfestigkeit gegen Seitenverschiebung mit Hilfe fester Dreiecke (BDE und ADF in Abb. 17).

Bei transversalen Mahlbewegungen, die mit einer in Kurven verlaufenden Exkursion der Mandibula verbunden sind, wird das Hartgebilde auf Torsion beansprucht. Es kann dabei zu einer Drehung des Zahnes um seine Vertikalachse kommen, wie man

es nicht selten bei einwurzeligen Zähnen beobachtet. Als Sicherung gegen diese Beanspruchung sind die Kreisfasern angeordnet, die quer zum Zahnbogen über den lingualen und labialen Alveolensaum verlaufen; sie drücken zugleich das Zahnfleisch gegen den Zahnhals.

Die bedeutendsten Anforderungen werden an die Gesamtmasse des Zahnfleisches gestellt, wenn sie die durch seitliche Kaubewegung bewirkte Heraushebelung des Zahnes senkrecht zum Zahnbogen verhindern soll. Es muß dabei, wie aus den Abbildungen 14 und 15 ersichtlich, die bedeutende Horizontalkraft B überwunden werden. Um den Kräfteablauf zu erkennen, stellen wir einen oberen Schneidezahn in situ dar. Das Zahnfleisch erscheint hier als geschlossene Hülle, die die Seitenteile des knöchernen Alveolarfortsatzes zum Teil umfaßt und den Kieferkamm der interdentalen Räume bedeckt. Sofern nun der Zahn, dem Seitendruck nachgebend, Kippbewegungen macht, buchtet sich die Gingiva am Zahnhals labial aus; sie hat das Bestreben, sich zu verlängern, und zwar quer zur Hauptmasse seiner Längsfasern, die also innen gedrückt und außen gezogen, mithin gebogen werden. Um nun die schädliche Druck-Komponente möglichst auszuschalten, greift die Bewegung der labialen Fasern über auf den interdentalen Raum und erscheint in den hier gelagerten gingivalen Bindegewebselementen als Zug (Abb. 18). Dabei sind außer dem oberen und unteren Zahnband die Kreisfasern hervorragend beteiligt, woraus sich zugleich erklärt, daß bei einseitigem Ueberwiegen der Zugbeanspruchung eine Torsion erfolgen muß. Die Um-

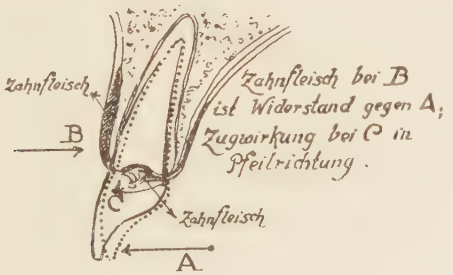


Abb. 18.
Widerstand des Zahnfleisches bei Horizontal-Hebelung des Zahnes.

steuerung von Druck aus den labialen Fasern zu Zug in den Zahn-Zwischenräumen ist ein wesentliches Merkmal der Konstruktionsidee; woraus wiederum die Sicherheitsmaßnahmen zu erklären sind, die der Organismus ergreift durch Verstärkung der Masse und sinnreiche Gliederung ihrer Bündel an der gefährdeten Stelle, nämlich den Zahnzwischenräumen. Die Arkadenform des Zahnfleisches ist der äußere Ausdruck dafür. Angriff und Widerstand der Gingiva bei Hebelwirkung kulminieren somit im Zahnzwischenraum; falls hier eine Schädigung eintritt, sei es durch zu tief greifende Kronenringe, schlecht sitzende Klammern, überhängende Proximalfüllungen oder dergl., kann die Standfestigkeit des Zahnes verringert werden; denn dem gesunden Zahnfleisch „gebührt an der Befestigung der Zähne ein wesentlicher Anteil" (Wetzel).

8. Das Konstruktionsprinzip der Kieferknochen in Beziehung zur Kaufunktion.

Der äußeren, strukturellen Erscheinung nach kann man an den Kieferknochen eine kompakte Schale von wechselnder Stärke unterscheiden, die einen Hohlraum einschließt, der von der Spongiosa, einem mehr oder weniger engmaschigem Netz- oder Flechtwerk aus Knochenbälkchen, durchzogen ist. Die Spongiosa-Bälkchen dürfen als auseinanderweichende Spannungslinien betrachtet werden, die frei zu Tage treten und dort, wo sie sich zusammendrängen zur Kompakta werden. Beide Bildungselemente, Kompakta und Spongiosa, sind also im statischen Sinne nur unterschiedliche Darstellungsformen des gleichen Konstruktionsgedankens, nach welchem das Baumaterial dort verstärkt wird, wo die größte Beanspruchung eintritt und sich auf einzelne Zug- oder Druckstreben beschränkt, wo die Festigkeitsforderung dies zuläßt. Der Knochen in seiner Ganzheit verhält sich wie ein homogenes elastisches Gebilde; es müßte sich somit die Spongiosa-Architektur in der Kompakta wiederfinden lassen. Man hat das in einfacher Weise makroskopisch zum Ausdruck gebracht, indem man in den entkalkten Knochen mit einer Ahle einsticht und die entstandenen Spaltöffnungen durch Einreiben von Farbe deutlich macht. Dann reihen sich die Spalten zu Zügen, den Spaltlinien auf, die als

Resultierende des Faserverlaufs im Knochen ein Architekturbild wie in Abb. 19 ergeben. Man erkennt daraus, daß der ganze

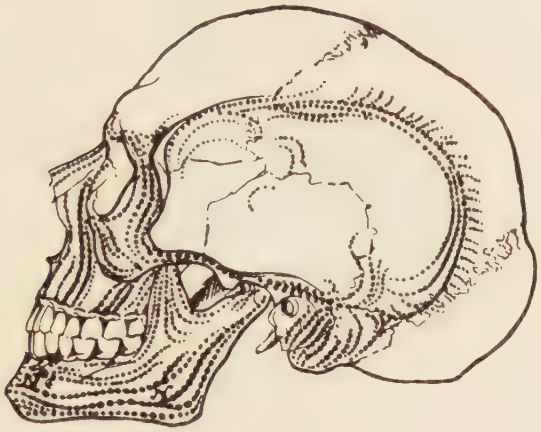


Abb. 19.
Spaltlinien-System nach Benninghoff.

Gesichtsschädel im wesentlichen für die Kaufunktionen durchkonstruiert ist, und da wir wissen, daß die Zähne Kraftträger- und Vermittler sind, so müssen sich Beziehungen ergeben aus den bisher erörterten Ergebnissen der Kaudruck-Umsteuerung von der Zahnwurzel zum Knochen und dem Architekturbild des Kiefers.

Als auffälliger Unterschied im Verlauf der Kraftlinien beider Kiefer zeigt sich, daß diejenigen des Oberkiefers steil aufwärts steigen etwa im Sinne der Längsaxen der Zähne, während sie im Körper und Alveolarfortsatz der Mandibula horizontal gelagert sind, senkrecht zu den Zähnen. Daraus ergibt sich für den Unterkiefer eine äußerst ungünstige Beanspruchung auf Biegung, die seine massige Form bedingt. Man kann den horizontal gelagerten Teil des Unterkiefers mit einem eingespannten Balken (B in Abb. 20) vergleichen, der durch die senkrechte Kraft P belastet ist. Infolge der Biegung werden die oberen Fasern des Balkens verlängert und gezogen, die unteren dagegen verkürzt und gedrückt. Bei intensiver Beanspruchung läßt sich der Widerstand des Balkens erheblich vergrößern, indem man im oberen Teil den Zug durch eine Konstruktion von eisernen Zugstangen abfängt. Man

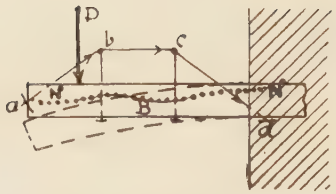


Abb. 20.
Armierter Balken B, durch Vertikallast P gebogen.

„armiert" die Konstruktion, wie es im praktischen Leben bei stark belasteten Balkon- oder Brückenträgern oft geschieht, um Materialverbrauch und Eigengewicht zu mindern. Der menschliche Unterkiefer ist dem Prinzip nach in dieser Form konstruiert; dabei entspricht das corpus mandibulae dem Balken, die Knochenbälkchen der Spongiosa den eisernen Zugstangen, wobei allerdings die Zahnfleischfasern des oklusalen Teiles erheblich mitwirken.

Der Kräfteaufwand beim Zubeißen ist etwa verstellbar wie in Abb. 22 schematisch anzudeuten versucht ist. Sobald durch Aufwärtsschwingen der Mandibula zwei oder mehr gegenüberliegende Zähne in pressende Berührung kommen, beginnen die Wurzeln, dem senkrechten Druck nachgebend, in ihre Bettung einzusinken, wobei Teile der Zahnwurzelfasern und des Periodontium angespannt werden und ihren Zug auf die interdentalen Spongiosa-Bälkchen übertragen. In der Region des Kieferkammes tritt einstweilen nur Zug ein, der basale Teil wird nicht wesentlich beeinflußt. Mäßige Kaufunktionen, wie sie etwa beim Zermahlen weicher Nahrungsmittel betätigt werden, dürften in dieser Form ablaufen. Bei gesteigertem Kaudruck vergrößert sich die obere Spannung und der apikale Teil gerät gleichzeitig unter Druck, der sich auf den Kieferkörper fortpflanzt; damit sind die Biegungsspannungen gegeben. Die Druckbeanspruchungen kulminieren im Kieferwinkel als Drehpunkt, daher sehen wir in der Abb. 19 hier die stärksten Spaltlinienzüge, auch die Zugspannungen sammeln sich an der gleichen Stelle, wie aus Abb. 20 hervorgeht; sie können als Trajectorium radiatum, das von den Molaren zur Kieferbasis nach hinten ausstrahlt, verkörpert sein.

Prof. Dr. A. Benninghoff, der die Biegungsbeanspruchung zugibt, vermißt „bogenförmige Spongiosazüge", die vom

äußerlich sichtbaren Trajectorium basale zu den Zähnen aufsteigen. Die sind im Innern des Knochens auch im Röntgenbild (Abb. 21) erkennbar, wenn sie nach außen nicht zu Tage treten, so kann das daran liegen, daß der Kieferknochen noch erheblich andere Funktionen hat als die der Biegung in sagittaler Richtung; denn der

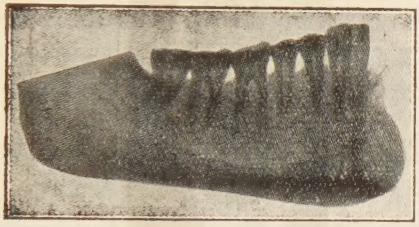


Abb. 21.

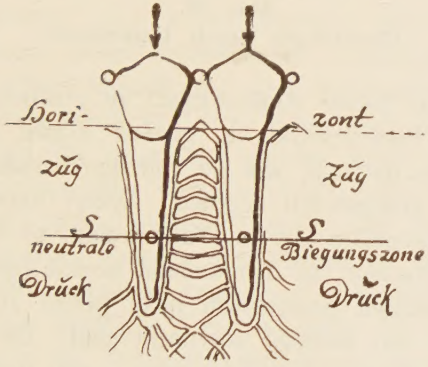


Abb. 22.
Spongiosa-Bälkchen unter Zug und Druck.

genannte Autor sagt selbst, daß „die Knochen in ihrer Architektur immer nur auf die resultierende Gesamtbelastung angelegt sind". Nun erinnern wir uns, daß bei den meisten Kaufunktionen infolge Ueberbisses, Schrägstellung der Zähne, Uebergreifen der Kronenhöcker etc. neben der Vertikalbelastung, die eine Biegung hervorruft, auch eine bedeutende Seitenkomponente als Transversaldruck auftritt. Diese für die Standfestigkeit des Zahnes ungünstige Seitenhebelung erfordert erhebliche Sicherheitsmaßnahmen. Wir sehen im Querschnitt des Knochens (Abb. 23) wie die

Kompakta an der meist gefährdeten bukkalen Seite kräftig und massig entwickelt ist, so daß sie wohl imstande sein kann, Biegungslinien in sich aufzunehmen und zu überdecken.

Abb. 23.
Querschnitt durch Unterkiefer.

Es dürfte aus diesen Andeutungen zu ersehen sein, daß die Architektur der Kieferknochen in großen Zügen ein Abbild der Krafteinwirkungen darstellt, wie sie von den belasteten Zähnen in ihre Umgebung ausgestrahlt werden. Wenn dabei nicht immer die einzelnen Linienzüge klar zu Tage treten, so kann das daran liegen, daß ihr Verlauf bei den äußerst komplizierten und wechselnden Kaufunktionen gelegentlich nicht genau zu verfolgen ist, zumal wenn sie von anderen überdeckt sind. Die Knochen sind nicht nur, wie Benninghoff sagt, „auf ihre resultierende Gesamtbelastung eingestellt", sondern ihre Konstruktion berücksichtigt zugleich den ungünstigsten Belastungsfall, der als Kaufunktion im Bereiche der Möglichkeit liegt. Das würde z. B. für den Unterkiefer eintreten, wenn ein einzelner seiner vorderen Prämolaren den gesamten Kaudruck beim Zerkleinern eines harten Bissens aufnehmen muß und dabei den Kieferknochen abwärts biegt. Denn in diesem Falle ist der Hebelarm groß und die aufspaltende Wirkung auf der Kaufläche infolge niedriger Höcker nur gering. Das Kräftebild, das dabei entsteht, ist aus der Abb. 20 zu ersehen, wo die Einzellast P den Balken B abzubiegen bestrebt ist.

Konstruiert man nun in dem armierten Balken die mittlere Biegungszone, so entsteht eine mehrfache geschwungene Kurve NN; und der Verlauf der Spaltlinien des Unterkiefers in Abb. 19 zeigt überraschend genau die ähnliche Linienführung.

9. Zusammenfassung.

Der Kaudruck tritt als Kronenpressung äußerlich in die Erscheinung und wird vom Wurzelkörper abgefangen. Es ergibt sich daraus die Folgerung, daß die gleiche Kraft, welche die Krone trifft, sich in der Wurzel wiederfinden muß, nur mit umgekehrtem Vorzeichen, damit die Gleichgewichtslage des Zahnes erhalten bleibt. Aehnlich wie ein Schiff eine Deckslast des im Wasser befindlichen Rumpfes trägt, so findet die Zahnwurzel den erforderlichen Widerstand auf ihrer von Knochen und Weichteilen bedeckten Länge nur mit dem Unterschied, daß die Zahnwurzel, die im Gegensatz zum schwimmenden Schiff exzentrisch belastet sein kann, einen komplizierten Aufhängeapparat aus Bindegewebselementen braucht, um allen Anforderungen zu begegnen. Die Wurzel mobilisiert aus ihrer Umgebung Zugspannungen und Druckwirkungen, die unterstützt werden durch das natürliche Auftriebsvermögen gepreßter Fluida und die Adhäsion aus der Viskosität der Blut- und Gewebsflüssigkeit. Die Zugspannungen des gesund verankerten Zahnes überwiegen im zervikalen Teil der Wurzel, die Druckumsätze dagegen in der apikalen Region. Dadurch entstehen günstige Vorbedingungen für Biegungsbeanspruchungen sowohl der Zahnreihe als Ganzes wie auch für das einzelne Gebißglied. Es findet sich im Wurzelgebiet eine neutrale Zone, die beim Abbiegen des Unterkieferknochens durch Vertikalbelastung und bei Seitendruck gegen den Einzelzahn zu berücksichtigen ist. In dieser Zone würde bei seitlicher Bewegung des Zahnes infolge horizontal gerichteter Kräfte der Drehpunkt eines zweiarmigen Hebels entstehen, wenn der Widerstand des oral und vestibular seitlich am Kieferknochen liegenden Zahnfleischbandes nicht ausreicht, die Kippbewegung abzufangen. Die zwischen den Zahnkronen angeordneten Teile der Gingiva bilden durch ein System von festen Dreiecken ein wertvolles Hilfs-

mittel zur Sicherung der Standfestigkeit des Zahnes. Die Kraftumsätze von den Wurzeln funktionsfähiger Zähne strahlen in den umgebenden Knochen, sowohl der Kompakta wie Spongiosa aus und geben dem Ganzen eine typische Architektur, die durch Spaltlinien äußerlich sichtbar gemacht werden kann.